2 月 February
2020, 63(2): 191 – 198
昆 虫 学 报
ACTA ENTOMOLOGICA SINICA
http://www.insect.org.cn
doi: 10.16380/j.kcxb.2020.02.009

nC22 矿物油及其与吡虫啉混用对柑橘木虱的室内毒力评价

高 晶[#], 杨琼玉[#], 冯耀恒, 毛润乾[*]

(广东省生物资源应用研究所, 广东省动物保护与资源利用重点实验室, 广东省野生动物保护和利用公共实验室,
广东省矿物油农药工程技术研究中心, 广州 510260)

摘要:【目的】室内评价 nC22 矿物油单独使用,以及与吡虫啉混用对柑橘木虱 *Diaphorina citri* 的毒力,并筛选 nC22 矿物油对吡虫啉防治柑橘木虱具有增效作用的混配比例,为矿物油防治柑橘木虱的应用提供科学依据。【方法】使用 nC22 矿物油以及阳性对照 nC23 和 nC28 矿物油,采用浸渍法和喷雾法分别检测矿物油对柑橘木虱卵和低龄若虫、高龄若虫、成虫的致死作用,以处理后第 7 天(卵)和第 1 天(若虫和成虫)的 LC_{50} 值评估毒力。将 nC22 矿物油与吡虫啉以不同配比混配,测定混配液对低龄若虫的毒力,使用交互测定法、共毒因子(co-toxicity factor, CTF)法和共毒系数(co-toxicity coefficient, CTC)法评价矿物油对吡虫啉的增效作用。【结果】单独使用时,nC22 矿物油对卵的 LC_{50} 值低于 nC23 和 nC28 矿物油;对低龄若虫和高龄若虫的 LC_{50} 值与 nC23 矿物油相当,都低于 nC28 矿物油;对成虫的 LC_{50} 值与 nC28 矿物油相当,都低于 nC23 矿物油。与吡虫啉混用时,nC22 矿物油与吡虫啉混配比例为 3∶7, 4∶6 和 7∶3 时,矿物油对吡虫啉有增效作用:交互测定法中柑橘木虱低龄若虫的实际死亡率位于等效线的上方,CTF 值分别为 34.807, 22.655 和 40.798,CTC 值分别为 187.410, 183.876 和 222.936。3 种混配液中 7∶3 的混配比例对吡虫啉的增效作用最强。【结论】nC22 矿物油对柑橘木虱的毒力高于进口 nC23 矿物油及传统 nC28 矿物油,且以适当混配比例混用时 nC22 矿物油对吡虫啉具有显著增效作用,理论上可大幅减少化学杀虫剂的使用量,可进一步通过田间试验进行验证。

关键词: 柑橘木虱; 吡虫啉; 矿物油; 增效作用; 混配比例; 毒力

中图分类号: Q965.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-6296(2020)02-0191-08

Evaluation of laboratory toxicities of nC22 agricultural mineral oil and its mixture with imidacloprid against the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae)

GAO Jing[#], YANG Qiong-Yu[#], FENG Yao-Heng, MAO Run-Qian[*] (Guangdong Key Laboratory of Animal Conservation and Resource Utilization, Guangdong Public Laboratory of Wild Animal Conservation and Utilization, Guangdong Engineering Research Center for Mineral Oil Pesticides, Guangdong Institute of Applied Biological Resources, Guangzhou 510260, China)

Abstract:【Aim】The objective of this study is to evaluate the toxicities of nC22 mineral oil against the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*, when used alone or mixed with imidacloprid in the laboratory, and

基金项目: 广东省科学院科技发展专项(2019GDASYL-0501006, 2018GDASCX-0107, 2017GDASCX-0107, 2019GDASYL-0103055); 广东省科技计划项目(2017B020202005, 2015B090906011, 2016B090923009, 2016B090923005, 2016A020210056); 茂名石化公司科技攻关项目(MPBB160012)

作者简介: 高晶, 女, 1989 年 8 月生, 博士, 助理研究员, 研究方向为植物保护, E-mail: gaoj@giabr.gd.cn; 杨琼玉, 女, 1994 年 9 月生, 硕士研究生, 研究方向为植物保护, E-mail: 307352683@qq.com

[#]同等贡献作者 Authors with equal contribution

[*]通讯作者 Corresponding author, E-mail: maorun@giabr.gd.cn

收稿日期 Received: 2019-09-18; 接受日期 Accepted: 2019-12-13

to screen the mixing ratios that show synergistic effect on imidacloprid, so as to provide scientific support for the application of mineral oil against *D. citri*. 【Methods】 In the laboratory, the lethal effect of nC22 mineral oil and the positive controls nC23 and nC28 mineral oils against eggs, and the early instar nymphs, late instar nymphs, and adults of *D. citri* were determined by immersion method and spraying method, respectively, and the toxicities were calculated based on the LC_{50} values (7 d after treatment for eggs, and 1 d after treatment for nymphs and adults). The nC22 mineral oil was mixed with imidacloprid at various ratios, and their lethal effects on the early instar nymphs of *D. citri* were determined. The synergistic effect of nC22 mineral oil on imidacloprid was evaluated by interactive determination, co-toxicity factor (CTF), and co-toxicity coefficient (CTC) methods. 【Results】 When used alone, the LC_{50} value of nC22 mineral oil against *D. citri* eggs was significantly lower than those of nC23 and nC28 mineral oils. The LC_{50} values of nC22 mineral oil against both the early and late instar nymphs were similar to those of nC23 mineral oil, and lower than those of nC28 mineral oil. The LC_{50} value of nC22 mineral oil against adults was similar to that of nC28 mineral oil, and lower than that of nC23 mineral oil. The mixtures of nC22 mineral oil and imidacloprid at the ratios of 3∶7, 4∶6 and 7∶3 showed remarkable synergistic effect on imidacloprid: the actual mortalities of the early instar nymphs of *D. citri* were above the equivalent line in the interactive determination method, the CTF value were 34.807, 22.655, and 40.798, and the CTC values were 187.430, 183.876 and 222.936, respectively. The mixture of nC22 mineral oil and imidacloprid at the ratio of 7∶3 showed the strongest synergistic effect on imidacloprid. 【Conclusion】 nC22 mineral oil shows higher toxicity against *D. citri* than the imported nC23 and traditional nC28 mineral oils. When mixed with imidacloprid at proper ratios, nC22 mineral oil shows strong synergistic effect, and theoretically it can significantly reduce the use of chemical insecticide, which could be further tested in fields.

Key words: *Diaphorina citri*; imidacloprid; mineral oil; synergistic effect; mixing ratio; toxicity

柑橘木虱 *Diaphorina citri* 是一种重要的柑橘害虫,可传播柑橘黄龙病(huanglongbing, HLB)病菌,柑橘黄龙病是柑橘生产最严重的病害,号称“柑橘癌症”,目前尚无有效药剂进行治理,因而控制媒介昆虫柑橘木虱是防控柑橘黄龙病的主要措施(Iftikhar *et al*., 2014)。目前,化学药剂防治仍是控制柑橘木虱的主要手段,但化学药剂长期、大量使用,不仅增加害虫抗药性、造成防治成本高,还会危及有益生物、污染环境,因此需要新型防治策略(刘斌, 2015)。

矿物油属于有机农药,具有对环境友好、不产生抗药性且无残留、对有益生物毒害小等优点,是理想的害虫综合治理药剂(张志恒和陈丽萍, 2005)。目前矿物油被用于多种害虫的防治,如柑橘红蜘蛛 *Panonychus citri*(Chen *et al*., 2009)和柑橘小实蝇 *Dacus dorsalis*(欧阳革成等, 2010)等,矿物油也被用于对柑橘木虱的防治,研究集中在在田间或大棚内向寄主喷洒矿物油并调查柑橘木虱种群,以评价矿物油对柑橘木虱的防治效果(Rae *et al*., 1997; Tansey *et al*., 2015),缺乏矿物油对柑橘木虱的室内毒力数据。矿物油不仅可直接作为杀虫剂,还可作为化学杀虫剂的增效剂,研究表明在适当配比混配时矿物油对化学杀虫剂具有增效作用,两者混配使用可更有效防控蚜虫、螨类等害虫,并可减少化学杀虫剂使用量(Taverner *et al*., 2011; Wright *et al*., 2017)。目前评价矿物油与化学杀虫剂联合使用效果的方法,多是在田间或室内用药剂喷洒植物,随后调查害虫存活数目,以死亡率的大小判断农用矿物油与化学杀虫剂联合使用是否有防治效果和增效作用,且矿物油与化学杀虫剂混配对柑橘木虱的防治效果目前尚无报道。

nC22 矿物油(茂名 22 号)为中石化股份有限公司茂名分公司和广东省生物资源应用研究所合作,首次研发出的符合国家农药用精炼矿物油基础油标准的农用矿物油(梁智永等, 2019),研究其对柑橘木虱的毒力将为使用国产矿物油基础油进行害虫防控提供支持。本研究以 nC22 矿物油及柑橘木虱为研究对象,以 nC23 矿物油(绿颖, 有报道为 nC24,本课题组测得相对正构烷烃平均碳数 23, 未发表数据)和 nC28 矿物油(150SN)为阳性对照,去离子水

为阴性对照，实验室内采用浸渍法和喷雾法，探究矿物油单剂对不同发育阶段柑橘木虱的毒力；将 nC22 矿物油和吡虫啉混配，探究不同混配比例对柑橘木虱若虫的毒力，并用交互测定法、共毒因子法和共毒系数法筛选具有增效作用的混配比例。本研究探究矿物油及与吡虫啉混用对柑橘木虱的毒力，为在田间防治柑橘木虱提供科学依据，试验结果可进一步在田间进行验证。

1　材料与方法

1.1　材料

1.1.1　供试昆虫及植物：柑橘木虱采自中山大学南校区的九里香 *Murraya paniculata*；寄主植物九里香购自广州岭南花卉市场。柑橘木虱及植物饲养在温室内，设置为温度 26 ± 1℃，相对湿度 70% ± 5%，光照强度6 000 lx，光周期 14L∶10D。

1.1.2　供试试剂及药品：所用矿物油 nC22 基础油来自中国石化茂名分公司和广东省生物资源应用研究所，浓度为 828.8 kg/m^3；阳性对照 nC23 为 99% 乳油制剂来自韩国 SK 株式会社，浓度为 834.2 kg/m^3；nC28 基础油来自中国石化茂名分公司，浓度为 867.3 kg/m^3；阴性对照为去离子水；吡虫啉杀虫剂为 70% 水分散粒剂，来自拜耳作物科学有限公司。矿物油乳化剂为广东省生物资源应用研究所研发的乳化剂（一种农用喷洒油的乳化剂，CN200510101977.3）。

1.2　矿物油单剂对柑橘木虱的室内毒力测定

1.2.1　不同浓度矿物油农药配制：将乳化剂按 5% 添加量分别加入至 nC22 和 nC28 矿物油基础油中，配制成 95% nC22 矿物油乳剂和 95% nC28 矿物油乳剂（以下简称矿物油），与购买的 99% nC23 矿物油乳剂共 3 种，在预试的基础上用去离子水稀释 5 个浓度。

1.2.2　矿物油对柑橘木虱卵的致死作用：将 20 株带有嫩梢的九里香放于温室，接入 100 头柑橘木虱成虫，3 d 后移去成虫，剪取带有卵的嫩梢，用 Nikon 体视显微镜（SMZ1000）观察并记录卵的个数。参照浸渍法（李玲玲等，2009）对卵进行室内毒力测定。将带卵的嫩梢分别浸泡在 10 mL 不同浓度的矿物油和去离子水中，20 s 后取出，用湿润的棉花包住嫩梢的叶柄，放置在垫有湿润滤纸的培养皿中，转移至培养箱，设置与温室内同样的培养条件，每天记录卵的孵化情况直至第 7 天不再有卵孵化，统计未孵化卵的个数，计算死亡率。nC22 矿物油分别稀释 12.5，25，50.0，100 和 200 倍，nC23 矿物油分别稀释 3.12，6.25，12.5，25 和 50 倍，nC28 矿物油分别稀释 6.25，12.5，25，50 和 100 倍，以去离子水为对照，每个处理 3 次重复。

1.2.3　矿物油对柑橘木虱若虫的致死作用：用 Zeiss 体视显微镜（Discovery 20）观察各龄期柑橘木虱的形态特征（Tsai and Liu，2000），将其分为低龄若虫（1 – 3 龄）和高龄若虫（4 – 5 龄）（吴丰年等，2015）。

采用喷雾法，参考 Xue 等（2009）的方法进行室内毒力测定。向培养皿（直径 7 cm，高 1 cm）的底部倒入 10 mL 1.5% 琼脂，放九里香嫩叶片于琼脂表面，将 15 头柑橘木虱低龄若虫移至培养皿，使用喷雾塔（10 psi/50 kpa）分别喷洒 5 mL 不同浓度的矿物油及去离子水至培养皿中，然后转移至培养箱，打开培养皿盖干燥 30 min，盖上盖子，24 h 后，记录低龄若虫的死亡数，计算死亡率。nC22 矿物油分别稀释 1 200，2 000，2 800，3 600 和 4 000 倍，nC23 矿物油分别稀释 1 200，2 000，2 800，3 600 和 4 000 倍，nC28 矿物油分别稀释 200，400，800，1 200 和 1 600倍，以去离子水为对照，每个处理 3 次重复。高龄若虫做同样处理，分别喷洒不同浓度矿物油及去离子水，nC22 矿物油分别稀释 200，400，600，800 和 1 000 倍，nC23 矿物油分别稀释 200，400，600，800 和 1 000 倍，nC28 矿物油分别稀释 12.5，25，50，100 和 200 倍。

1.2.4　矿物油对柑橘木虱成虫的致死作用：采用 1.2.3 节描述的喷雾法进行测定，将 15 头柑橘木虱成虫移至培养皿后，使用喷雾塔分别喷洒不同浓度矿物油及去离子水至培养皿，然后转移至培养箱，干燥 30 min，再放置 24 h 后，记录成虫的死亡数，计算死亡率。nC22 矿物油分别稀释 50，100，200，400 和 800 倍，nC23 矿物油分别稀释 12.5，25，50，100 和 200 倍，nC28 矿物油分别稀释 25，50，100，200 和 400 倍，以去离子水为对照，每个处理 3 次重复。

1.3　矿物油与吡虫啉混配对柑橘木虱的毒力测定

将 nC22 矿物油和吡虫啉单剂分别配制为 LC_{50} 值所对应浓度的溶液，用该浓度溶液按不同体积比进行混配，混配比例分别为：矿物油∶吡虫啉 = 0∶10，1∶9，2∶8，3∶7，4∶6，5∶5，6∶4，7∶3，8∶2，9∶1 和 10∶0；组别命名为 1 – 11，以去离子水为对照，检测对低龄若虫的毒力作用，方法同 1.2.3 节，每个处理 3 次重复。采用 3 种方法检测分析。

（1）交互测定法：按公式计算实际死亡率和理论死亡率，根据理论死亡率绘制等效线，若实际死亡

率在等效线上方,表示该配比混剂具有增效作用,反之则为拮抗作用,若实际死亡率接近等效线,表明该配比混剂具有相加作用(汪涛, 2017)。

实际死亡率(%)=(处理组死亡率－对照组死亡率)/(100－对照组死亡率)×100;

理论死亡率(%)=A 药剂 LC_{50} 剂量下试虫实际死亡率×混剂中 A 药剂 LC_{50} 所占的比例+B 药剂 LC_{50} 剂量下试虫实际死亡率×混剂中 B 药剂 LC_{50} 所占的比例。

(2)共毒因子法:按公式计算共毒因子(co-toxicity factor, CTF)。如共毒因子大于 20 表示为增效作用,小于－20 表示为拮抗作用,在－20～20 之间表示为相加作用(陈雪林等, 2011)。

共毒因子=(实际死亡率－理论死亡率)/理论死亡率×100。

(3)共毒系数法:上述两种方法筛选得到的有增效作用的矿物油与吡虫啉配比液,即矿物油: 吡虫啉=3∶7, 4∶6, 7∶3,将 3 种混配液用去离子水分别稀释为不同的浓度,3∶7配比液稀释浓度为 80.22, 40.11, 26.74, 20.05, 16.04 和 13.37 mg/L;4∶6配比液稀释浓度为 105.93, 52.96, 35.31, 26.48, 21.19 和 17.65 mg/L;7∶3 配比液稀释浓度为 183.07, 91.54, 61.03, 45.77, 36.61 和 30.51 mg/L。矿物油单剂(10∶0, v/v)用去离子水稀释浓度为 688.98, 415.01, 344.49, 298.88 和 234.06 mg/L,吡虫啉单剂(0∶10, v/v)用去离子水稀释浓度为 25.00, 12.50, 6.25, 3.13, 1.56, 0.78 和 0.39 mg/L。

按照 1.2.3 节方法测定对柑橘木虱低龄若虫的毒力作用,得到 3 种混配剂、矿物油单剂和吡虫啉单剂的 LC_{50} 值,计算共毒系数(co-toxicity coefficient, CTC),如共毒系数大于 120 表示增效作用,80－120 之间表示相加作用,小于 80 表示拮抗作用(汪涛, 2017)。

毒力指数(TI)=标准药剂的 LC_{50}/供试药剂的 LC_{50}×100;

混剂实际毒力指数(ATI)=标准药剂的 LC_{50}/混剂的 LC_{50}×100;

混剂理论毒力指数(TTI)=TI(A)×药剂 A 在混剂中的质量分数+TI(B)×药剂 B 在混剂中的质量分数;

共毒系数(CTC)=混剂实际毒力指数(ATI)/混剂理论毒力指数(TTI)×100。

1.4 数据分析

用 SPSS V21.0 统计软件进行 Probit 回归分析,计算毒力回归方程的斜率及斜率标准误,LC_{50} 值和 95% 置信区间。

2 结果

2.1 矿物油单剂对柑橘木虱的毒力

与 nC23 和 nC28 2 种矿物油相比,nC22 矿物油对柑橘木虱卵的毒力最高,处理后 7 d 其 LC_{50} 值最低,为7 164.068 mg/L,其次为 nC28 矿物油,LC_{50} 值为24 576.238 mg/L。对柑橘木虱卵毒力最低的为 nC23 矿物油,LC_{50} 值为 94 604.142 mg/L(表 1)。对照去离子水对卵的致死率为(2.19±1.33)%。

3 种矿物油中,nC22 矿物油对低龄若虫的毒力略高于 nC23 矿物油,处理后 1 d 其 LC_{50} 分别为 253.620 和 299.187 mg/L,nC28 矿物油对低龄若虫的毒力最低,LC_{50} 值为 2 050.802 mg/L(表 2)。对照去离子水对低龄若虫没有致死作用。

nC22 矿物油对高龄若虫的毒力略高于 nC23 矿物油,处理后 1 d 其 LC_{50} 值分别为 1 327.410 和 1 750.929 mg/L,最低的为 nC28 矿物油,LC_{50} 值为 22 344.371 mg/L(表 3)。对照去离子水对高龄若虫没有致死作用。

nC22 矿物油对成虫的毒力较略高于 nC28 矿物油,处理后 1 d 其 LC_{50} 值分别为 5 939.204 和 7 100.003 mg/L,最低的为 nC23 矿物油,LC_{50} 值为 37 861.712 mg/L(表 4)。对照去离子水对成虫没有致死作用。

表 1 矿物油对柑橘木虱卵的毒力

Table 1 Toxicity of mineral oils to eggs of *Diaphorina citri*

矿物油 Mineral oils	斜率±标准误 Slope ± *SE*	致死中浓度(mg/L) LC_{50}	95%置信区间(mg/L) 95% confidence interval	χ^2
nC22	1.375±0.105	7 164.068	4 729.762－9 728.449	43.791
nC23	0.836±0.123	94 604.142	50 281.872－529 844.283	73.861
nC28	1.076±0.145	24 576.238	18 582.459－32 032.997	12.033

分别在处理后 7 d(卵)和 1 d(若虫和成虫)测定毒力。The toxicity was determined at 7 d after treatment for eggs and 1 d after treatment for nymphs and adults, respectively. 下同 The same below.

表 2　矿物油对柑橘木虱低龄若虫的毒力

Table 2　Toxicity of mineral oils to the early instar nymphs of *Diaphorina citri*

矿物油 Mineral oils	斜率 ± 标准误 Slope ± *SE*	致死中浓度(mg/L) LC_{50}	95% 置信区间(mg/L) 95% confidence interval	χ^2
nC22	3.080 ±0.520	253.620	214.731 – 289.097	4.419
nC23	3.117 ±0.506	299.187	259.490 – 341.036	4.173
nC28	1.756 ±0.294	2 050.802	1 599.000 – 2 934.424	6.185

表 3　矿物油对柑橘木虱高龄若虫的毒力

Table 3　Toxicity of mineral oils to the late instar nymphs of *Diaphorina citri*

矿物油 Mineral oils	斜率 ± 标准误 Slope ± *SE*	致死中浓度(mg/L) LC_{50}	95% 置信区间(mg/L) 95% confidence interval	χ^2
nC22	2.746 ±0.414	1 327.410	1 131.503 – 1 544.859	2.492
nC23	3.339 ±0.429	1 750.929	1 542.082 – 2 026.456	7.493
nC28	2.412 ±0.279	22 344.371	18 471.224 – 27 295.150	13.658

表 4　矿物油对柑橘木虱成虫的毒力

Table 4　Toxicity of mineral oils to adults of *Diaphorina citri*

矿物油 Mineral oils	斜率 ± 标准误 Slope ± *SE*	致死中浓度(mg/L) LC_{50}	95% 置信区间(mg/L) 95% confidence interval	χ^2
nC22	1.704 ±0.215	5 939.204	4 736.560 – 7 762.560	8.836
nC23	2.388 ±0.277	37 861.712	31 340.508 – 47 429.425	16.771
nC28	2.150 ±0.236	7 100.003	5 813.444 – 8 571.118	10.436

2.2　矿物油吡虫啉混配对柑橘木虱若虫的毒力

交互测定法分析不同配比的混配剂对柑橘木虱低龄若虫的毒力(处理后 1 d)结果见图 1。nC22 矿物油与吡虫啉配比为 5∶5, 6∶4和 8∶2时,柑橘木虱的实际死亡率接近等效线,表明两者具有相加作用;混配比例为 1∶9, 2∶8和 9∶1时,柑橘木虱的实际死亡率在等效线下方,表明两者具有拮抗作用;配比为 3∶7, 4∶6和7∶3时实际死亡率位于等效线的上方,表明这 3 个配比混剂具有增效作用;对这 3 个点向等效线做垂线,垂线段越长,增效作用越大,即增效作用从大到小依次为 7∶3, 3∶7和 4∶6。

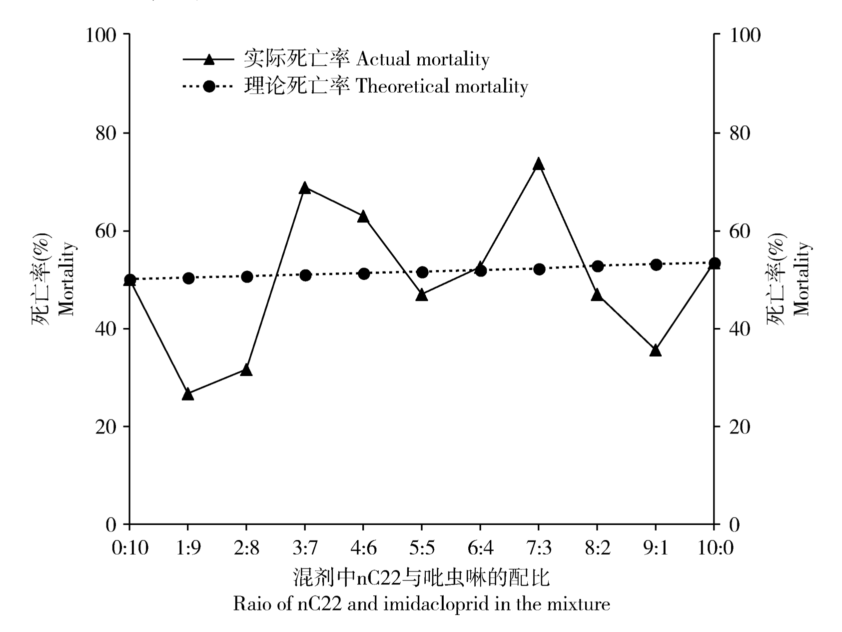


图 1　柑橘木虱低龄若虫上 nC22 矿物油对吡虫啉的增效作用(交互测定法)

Fig. 1　Synergistic effect of nC22 mineral oil on imidacloprid on the early instar nymphs of *Diaphorina citri* by interactive determination method

共毒因子法分析不同配比的混配剂对柑橘木虱低龄若虫的毒力(处理后 1 d)结果见表 5。nC22 矿物油与吡虫啉混配比例为 5∶5, 6∶4 和 8∶2 时,共毒因子在 -20 ~ 20 之间,表明两者具有相加作用;混配比例为 1∶9, 2∶8 和 9∶1 时,共毒因子均小于 -20,表明两者具有拮抗作用;混配比例为 3∶7, 4∶6 和 7∶3 时共毒因子都大于 20,表明按这 3 种配比进行混配使用时,nC22 矿物油对吡虫啉具有增效作用,其中,配比为 7∶3 时共毒因子最大,结果与交互测定法一致。

共毒系数法测定 nC22 矿物油与吡虫啉混配对柑橘木虱低龄若虫的毒力(处理后 1 d)结果见表 6。当 nC22 矿物油与吡虫啉混配比例为 7∶3, 4∶6 和 3∶7 时,共毒系数均大于 120,表明 3 个混配比例都有增效作用,且 7∶3 比例混配时共毒系数最大,与前面两种分析方法结果一致。

表 5 柑橘木虱低龄若虫上 nC22 矿物油对吡虫啉的增效作用(共毒因子法)

Table 5 Synergistic effect of nC22 mineral oil on imidacloprid on the early instar nymphs of *Diaphorina citri* by co-toxicity factor (CTF) method

组别 Groups	nC22∶吡虫啉(v∶v) nC22∶imidacloprid	实际死亡率(%) Actual mortality	理论死亡率(%) Theoretical mortality	共毒因子 CTF
1	0∶10	50	50	0.000
2	1∶9	26.667	50.333	-47.020
3	2∶8	31.579	50.667	-37.673
4	3∶7	68.700	51.000	34.804
5	4∶6	62.963	51.333	22.655
6	5∶5	47.059	51.667	-8.918
7	6∶4	52.632	52.000	1.215
8	7∶3	73.684	52.333	40.798
9	8∶2	47.059	52.667	-10.648
10	9∶1	35.714	53.000	-32.615
11	10∶0	53.333	53.333	0.000

表 6 柑橘木虱低龄若虫上 nC22 矿物油对吡虫啉的增效作用(共毒系数法)

Table 6 Synergistic effect of nC22 mineral oil on imidacloprid on the early instar nymphs of *Diaphorina citri* by co-toxicity coefficient (CTC) method

混配比例(v∶v)(nC22∶吡虫啉) Mixing ratio of nC22 and imidacloprid	斜率±标准误 Slope ± *SE*	混剂 LC_{50}(mg/L) LC_{50} of the mixture	混剂中吡虫啉 LC_{50}(mg/L) LC_{50} of imidacloprid in the mixture	χ^2	95%置信区间(mg/L) 95% confidence interval	共毒系数 CTC
0∶10	1.299 ± 0.138	3.081	3.081	10.182	2.343 - 4.045	-
3∶7	1.716 ± 0.300	42.778	1.151	3.560	34.407 - 59.706	187.410
4∶6	1.418 ± 0.286	57.690	1.008	6.201	44.777 - 87.461	183.876
7∶3	1.580 ± 0.293	82.246	0.417	4.502	65.907 - 111.720	222.936
10∶0	3.196 ± 0.402	259.829	0.000	29.371	236.208 - 283.450	-

3 讨论

矿物油在 21 世纪初就被纳入害虫综合治理(IPM)药剂,可防治多种害虫。田间试验发现喷洒矿物油可控制柑橘木虱密度并减少黄龙病发生(Leong *et al*., 2012),但矿物油对柑橘木虱的室内毒力缺乏研究,且矿物油与化学杀虫剂混配对柑橘木虱的毒力尚未见报道。本研究室内测定 nC22 矿物油单独使用以及与吡虫啉混配对柑橘木虱的毒力,比较 nC22 矿物油与进口 nC23 矿物油、传统 nC28 矿物油对各发育阶段柑橘木虱的毒力,并利用交互测定法、共毒因子法和共毒系数法评价 nC22 矿物油对吡虫啉防治柑橘木虱的增效作用,结果表明:单独使用时,其毒力高于 nC23 矿物油及 nC28 矿物油;与吡虫啉联合使用时,nC22 矿物油与吡虫啉混配比例为 3∶7, 4∶6 和 7∶3 时对吡虫啉具有增效作用,且理论上 7∶3 混配比例对吡虫啉具有最大的

增效减量作用。本研究为利用矿物油为杀虫剂和增效剂来防治柑橘木虱的进一步开发应用提供理论依。

矿物油对昆虫的毒力因龄期而异，本研究发现 nC22 矿物油对柑橘木虱低龄若虫毒力最高，对卵的毒力最低（表 1 ~ 4），与田间试验结果一致（Rae *et al.*, 1997）。矿物油被广泛认为是通过在昆虫表面形成完整的油膜，使昆虫窒息而死，宜于防治体型较小昆虫，因而对低龄若虫毒力最高（张志恒和陈丽萍，2005），本研究中 nC23 和 nC28 矿物油也是对柑橘木虱低龄若虫毒力最高（表 2）。矿物油对卵的毒力大小因害虫种类而异，Xue 等（2009）比较矿物油对不同发育阶段二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 和智利小植绥螨 *Phytoseiulus persimilis* 的 LC_{50}，发现矿物油对二斑叶螨卵毒力最高，而对智利小植绥螨卵的毒力最低，推测与卵的表面结构、大小、孵化时间等因素有关，如二斑叶螨卵表面附有丝，可吸附矿物油，导致对矿物油敏感，因此，可能柑橘木虱卵的一些生理特性导致矿物油对其毒力低。此外，成虫各方面发育完全、头部和翅为革质，且移动性强，因而矿物油对其毒力低（Xue *et al.*, 2009）。本研究对不同龄期柑橘木虱的毒力结果表明，当柑橘木虱低龄若虫较多时，适宜喷洒 nC22 矿物油进行防控。

矿物油理化性质影响其作用效果及安全性，这些理化性质包括相对正构烷烃平均碳数（nCy）、相对正构烷烃碳数差、非磺化物含量、粘度、密度等，然而具体影响因素及机理却不清楚。已报道 nCy 和相对正构烷烃碳数差影响矿物油的拒避效果（欧阳革成等，2007），粘度比重影响矿物油抑制昆虫传毒效果（Wijs, 1980）。我们检测出 3 种矿物油在这些理化性质方面存在差异（未发表数据），表明矿物油对昆虫的毒力也可能与其理化性质有关。检测发现 3 种矿物油中 nC22 和 nC23 矿物油符合农业部精炼矿物油标准，nC22 比 nC23 毒力高，可能也与相对正构烷烃碳数差差异有关：nC22 和 nC23 的 nCy 分别为 22 和 23，相对正构烷烃碳数差分别为 2 和 5，因矿物油中的碳数含量一般呈正态分布，相对正构烷烃碳数差越小，nCy 所占的百分比含量越高，毒力越高。虽然矿物油对害虫毒力机理及有效组分需进一步探索，本研究证明我国研发的矿物油基础油对柑橘木虱毒力略高于进口矿物油，可助于推动农用矿物油使用的国产化。

矿物油可增加化学杀虫剂的渗透性、粘着性、展着性、扩散性和持效性，增加有效成分的沉积量和抗冲刷能力，并协助有效成分渗透进入害虫和作物体内，从而有效提高化学杀虫剂的防治效果（全金成等，2018）。本研究通过交互测定法、共毒因子法初步筛选，再用共毒系数法验证及定量，最终确定矿物油与吡虫啉以 7∶3的混配比例混配后对柑橘木虱低龄若虫的毒力最高。根据单剂中吡虫啉的有效浓度和混配剂中吡虫啉的有效浓计算，达到 95% 死亡率时，nC22 矿物油与吡虫啉以 7∶3的混配比例使用理论上可减少吡虫啉用量达 91.95%。因吡虫啉属于内吸式杀虫剂，矿物油可能通过促进吡虫啉在植物叶片和柑橘木虱体表的渗透性和展着性，以达到增效目的。吡虫啉被报道可用于柑橘木虱的防控（Chen and Stelinski, 2017），但吡虫啉可对非靶标生物，如天敌、鱼类、蜜蜂等产生致命性，并且随着吡虫啉的滥用，靶标害虫产生抗性的速度增大（邱光，2005），本研究结果对顺应绿色农业和无公害农业的发展趋势，减少吡虫啉用量具有重要指导意义。此外，矿物油具有广谱性，对作物及果树上小型昆虫，如蚜虫、螨、红蜘蛛、柑橘小实蝇等均具有毒杀作用（欧阳革成等，2007；Xue *et al.*, 2009；Galimberti and Alyokhin, 2018；全金成等，2018），因此矿物油与化学杀虫剂混用，还可以同时控制多种害虫，从而进一步减少化学杀虫剂的使用。矿物油单独使用以及与吡虫啉联合使用对柑橘木虱的毒力还需要后续进行田间试验，以验证 nC22 矿物油在柑橘木虱防治中的应用。

参考文献（References）

Chen CX, Zheng JH, Xie JZ, Xie XT, Mao RQ, 2009. Pest management based on petroleum spray oil in navel orange orchard in Ganzhou, South China. *J. Pest. Sci.*, 82(2): 155 – 162.

Chen XD, Stelinski LL, 2017. Rapid detection of insecticide resistance in *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) populations, using a bottle bioassay. *Fla. Entomol.*, 100(1): 124 – 133.

Chen XL, Sun R, Du YZ, Wang JJ, 2011. Co-toxicities of abamectin with three other insecticides against the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*. *Plant Prot.*, 37(5): 206 – 209. [陈雪林，孙蓉，杜予州，王建军，2011. 阿维菌素与三种杀虫剂对西花蓟马的联合毒力. 植物保护，37(5): 206 – 209]

Galimberti A, Alyokhin A, 2018. Lethal and sublethal effects of mineral oil on potato pests. *J. Econ. Entomol.*, 111(3): 1261 – 1267.

Iftikhar Y, Rauf S, Shahzad U, Zahid MA, 2014. Huanglongbing: pathogen detection system for integrated disease management – a review. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, 15(1): 1 – 11.

Leong SCT, Abang F, Beattie A, Kueh RJH, Wong SK, 2012. Impacts of horticultural mineral oils and two insecticide practices on

population fluctuation of *Diaphorina citri* and spread of huanglongbing in a citrus orchard in Sarawak. *Sci. World J.*, 12: 1-7.

Li LL, Xue M, Ren GW, Li QL, Zhang QC, Wang HT, 2009. Toxicity of several insecticides to different instars nymphs of *Bemisia tabaci* and the repellent actions to the adults. *Acta Phytophyl. Sin.*, 36(4): 359-365. [李玲玲, 薛明, 任广伟, 李庆亮, 张庆臣, 王洪涛, 2009. 药剂对B型烟粉虱不同虫态的毒力和对成虫的驱避效应. 植物保护学报, 36(4): 359-365]

Liang ZY, Lu ZX, Yang QY, Feng YH, Mao RQ, 2019. The production of high standard agricultural mineral base oil. *Agrochemicals*, 58(4): 258-261. [梁智永, 卢振旭, 杨琼玉, 冯耀恒, 毛润乾, 2019. 高标准矿物油农药基础油的研制. 农药, 58(4): 258-261]

Liu B, 2015. Detection of Insecticides Susceptibility and Analyses of Insecticides Resistance-related Genes. PhD Dissertation, Southwest University, Chongqing. [刘斌, 2015. 柑橘木虱对杀虫剂敏感性检测及抗药性相关基因分析. 重庆: 西南大学博士学位论文]

Ouyang GC, Cen YJ, Yu SK, Huang MD, Liang GW, Zhang BL, 2010. Assay of repellent components of mineral oils against the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae). *Acta Entomol. Sin.*, 53(6): 655-663. [欧阳革成, 岑伊静, 余树楷, 黄明度, 梁广文, 张本龙, 2010. 矿物油乳剂拒避橘小实蝇的有效组分分析. 昆虫学报, 53(6): 655-663]

Ouyang GC, Yang YP, Zhong GL, Xiong JJ, Huang MD, 2007. Effects of 4 mineral spray oils on oviposition behavior of *Bactrocera* (*Bactrocera*) *dorsalis* and *Diaphorina citri*. *Plant Prot.*, 33(4): 72-74. [欧阳革成, 杨悦屏, 钟桂林, 熊锦君, 黄明度, 2007. 4种矿物油乳剂对柑橘小实蝇和柑橘木虱产卵行为的影响. 植物保护, 33(4): 72-74]

Qiu G, 2005. Advances on the application and hazards of imidacloprid. *Entomol. J. East China*, 14(1): 76-81. [邱光, 2005. 吡虫啉的应用及其负面效应的研究进展. 华东昆虫学报, 14(1): 76-81]

Quan JC, Jiang YH, Tan BL, 2018. Control of citrus red spider by mineral oil and its synergistic test. *South Hortic.*, 29(1): 13-16. [全金成, 江一红, 谭炳林, 2018. 矿物油防治柑橘红蜘蛛及其增效试验. 南方园艺, 29(1): 13-16]

Rae DJ, Liang WG, Watson DM, Beattie GAC, Huang MD, 1997. Evaluation of petroleum spray oils for control of the Asian citrus psylla, *Diaphorina citri* (Kuwayama) (Hemiptera: Psyllidae), in China. *Int. J. Pest Manag.*, 43(1) 71-75.

Tansey JA, Jones MM, Vanaclocha P, Robertson J, Stansly PA, 2015. Costs and benefits of frequent low-volume applications of horticultural mineral oil for management of Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae). *Crop Prot.*, 76: 59-67.

Taverner PD, Sutton C, Cunningham NM, Dyson C, Lucas N, Myers SW, 2011. Efficacy of several insecticides alone and with horticultural mineral oils on light brown apple moth (Lepidoptera: Tortricidae) eggs. *J. Econ. Entomol.*, 104(1): 220-224.

Tsai JH, Liu YH, 2000. Biology of *Diaphorina citri* (Homoptera: Psyllidae) on four host plants. *J. Econ. Entomol.*, 93(6): 1721-1725.

Wang T, 2017. Study on Insecticidal Toxicity Preparation of Two New Pesticides and Periplocoside Active in Gradients with *Plutella xylostella*. MSc Thesis, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi. [汪涛, 2017. 两种新型杀虫剂与杠柳活性成分混用对小菜蛾的配方筛选研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文]

Wijs JJD, 1980. The characteristics of mineral oils in relation to their inhibitory activity on the aphid transmission of potato virus Y. *Neth. J. Plant Pathol.*, 86(6): 291-300.

Wright PJ, Walker GP, MacDonald FH, Gardner-Gee R, Hedderley DI, 2017. Mineral oil foliar applications in combination with insecticides affect tomato potato psyllid (*Bactericera cockerelli*) and beneficial insects in potato crops. *New Zeal. J. Crop Hortic.*, 45(4): 263-276.

Wu FN, Cen YJ, Liang GW, 2015. Effects of different host plants, host plant maturity and intact host plants versus detached host plant stems on the survival of *Diaphorina citri* Kuwayama. *J. Appl. Entomol.*, 52(3): 679-685. [吴丰年, 岑伊静, 梁广文, 2015. 不同离体寄主及其成熟度对亚洲柑桔木虱存活的影响. 应用昆虫学报, 52(3): 679-685]

Xue YG, Beattie GAC, Meats A, Spooner-Hart, Herron GA, 2009. Relative toxicity of nC24 agricultural mineral oil to *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) and *Phytoseiulus persimilis* Athias-Henriot (Acari: Phytoseiidae) and its possible relationship to egg ultrastructure. *Aust. J. Entomol.*, 48(3): 251-257.

Zhang ZH, Chen LP, 2005. The safety and application of mineral oil for the control of plant disease and insect. In: Conference Proceedings of the International Conference on Pesticide and Environmental Safety. China Agricultural University Press, Beijing. 358-362. [张志恒, 陈丽萍, 2005. 矿物油的安全性及其在植物病虫害防治中的应用. 见: 农药与环境安全国际会议论文集. 北京: 中国农业大学出版社. 358-362]

(责任编辑: 赵利辉)